

УДК 629.7.002:621.778

А.М. Потапов, канд. техн. наук,
 В.А. Коваленко, канд. техн. наук,
 Л.П. Малый,
 А.В. Кондратьев, канд. техн. наук

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ОРГАНОПЛАСТИКОВОЙ ОБОЛОЧКИ КОМБИНИРОВАННОГО БАЛЛОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Среди агрегатов ракет-носителей (РН) и орбитальных космических аппаратов (КА), обеспечивающих высокую прочность и жесткость при относительно низкой массе с каждым годом увеличивается число объектов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1 – 3].

К числу таких агрегатов, освоенных для отечественных РН в Государственном предприятии «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» относятся и баллоны высокого давления [4 – 6]. Они предназначены для размещения необходимого количества рабочего тела (сжатого газа) на борту РН и обеспечения его сохранности в течение заданного времени при подготовке к пуску, подачи газа на наддув топливного отсека и на запуск двигателя.

Баллон высокого давления представляет собой двухслойную конструкцию. Внутренний металлический корпус состоит из стальной сферической оболочки, стального кольца на экваторе, наконечников (глухого и проходного). Корпус обеспечивает герметичность баллона и служит в качестве технологической оснастки для намотки наружного слоя. Материал сферической оболочки – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Эскиз стального корпуса баллона показан на рис. 1.

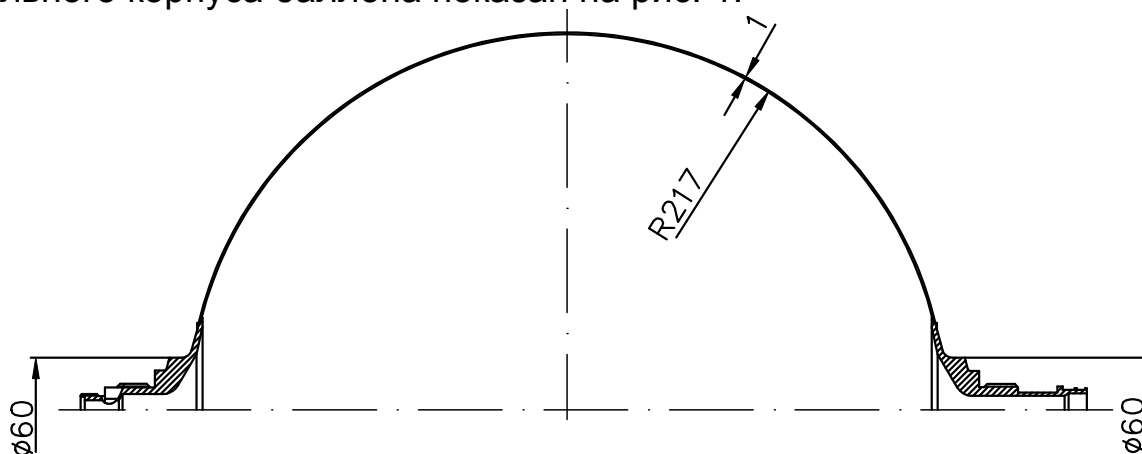


Рисунок 1 – Эскиз стального корпуса баллона

Материал упрочняющей оболочки (УО) – органопластик на основе высокомолекулярного жгута Русар и эпоксидного связующего ЭДТ-10.

Баллон имеет следующие основные расчетные характеристики:

- внутренний объем – 42,2 дм³;
- наружный диаметр стального слоя – 434 мм;
- наружный диаметр с УО – не более 450 мм;

- давление рабочее – 34,6 МПа;
- давление разрушения – не менее 69,2 МПа;
- масса металлического корпуса баллона – 5,7 кг;
- масса баллона с УО – 13,1 кг.

В конструкциях аналогичных баллонов преимущественно применялся металл. Однако проблема снижения массы конструкции привела к необходимости использования неметаллических материалов, обладающих высокой прочностью и низкой плотностью. К таким материалам относятся как органопластики, так и углепластики [7].

Предпочтение было отдано органопластику на основе органожгута Русар и эпоксидного связующего ЭДТ-10, так как этот материал наряду с высокими физико-механическими характеристиками (ФМХ) обладает хорошей технологичностью при изготовлении изделий методом «мокрой» намотки.

Органожгут Русар обладает высокими прочностными и технологическими характеристиками, предназначен для изделий специального назначения. ФМХ жгута Русар приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики жгута Русар

Наименование показателей	Норма
Относительное отклонение фактической линейной плотности от номинальной, %, не более	± 5
Разрывная нагрузка жгута, Н, не менее	2000
Разрушающее напряжение элементарной нити при растяжении в микропластике, МПа, не менее	4500
Коэффициент вариации по разрушающему напряжению элементарной нити в микропластике, не менее	8
Модуль упругости комплексной нити, ГПа, не менее	130

В качестве связующего выбрана эпоксидная смола ЭДТ-10. Его ФМХ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики связующего ЭДТ-10

Наименование показателей	Показатели
Модуль упругости при растяжении, МПа	28-30
Относительное удлинение при растяжении	5,0
Коэффициент Пуассона	0,32
Плотность, г/см ³	1,18
Теплостойкость по Мартенсу, °С	100
Температура полимеризации, °С	140 – 160
Разрушающее напряжение при:	
– растяжении, МПа	0,7
– сжатии, МПа	1,7
– изгибе, МПа	1,4

Компоненты этого связующего выпускаются промышленностью и на сегодняшний день максимально исследованы с учетом требований к материалу, работающему в условиях космоса. Оно уже использовалось в разработках изделий ГП «КБ «Южное», например [6 – 9].

Для обеспечения намотки УО была спроектирована, изготовлена, смонтирована и отлажена следующая технологическая оснастка:

- нитераскладчик для намотки малогабаритных баллонов для станка КУ-463Ф3;
- приспособление для намотки УО на станке КУ-463-Ф3;
- ложемент для проведения слесарных работ с шаровым баллоном;
- приспособление для вращения шаробаллона с УО в печи при полимеризации.

Были разработаны технологический процесс на изготовление упрочняющей оболочки баллона, маршрутно-технологический паспорт и технологическое указание на отбор и изготовление образцов органожгута для определения его разрывной нагрузки.

Для обеспечения условий равнонапряженного состояния УО по всему контуру выбрана зональная схема намотки, состоящая из 16 зон. Для намотки каждой зоны разработана отдельная программа:

1 зона – номер программы 4С4С014; 2 зона – номер программы 4С4С024; с 3 зоны по 16 зону номера программ 4С4С03...4С4С16 соответственно.

Параметры намотки УО приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры намотки УО

Наименование параметров	Значение параметров
Разрывная нагрузка жгута Русар, средняя в ленте, Н, не менее	2200
Ширина ленты, мм	18
Натяжение ленты на экваторе, Н, не менее	300
Зазор между жгутами в ленте и в стыках лент, мм, не более	1
Температура связующего в пропиточной ванне, °С	60±5°С
Количество жгутов в ленте по зонам, шт.	4(a ₁) – 2 слоя 5(a ₂ , a ₃) – 1 слой 4(с a ₄ по a ₁₅) – 1 слой 4(a ₁₆) – 2 слоя

Технологическая отработка программ намотки УО проводилась на намоточном станке с программным управлением. В качестве металлического корпуса баллона был использован его имитатор.

В процессе отработки программ определялись следующие технологические параметры:

- начало намотки каждой зоны по дуге;
- нулевые точки координат станка;
- количество витков в слое;
- скорость намотки;
- величина натяжения армирующей ленты на экваторе;
- ширина армирующей ленты на экваторе;
- количество жгутов в ленте по зонам;
- зазор в стыках лент.

В процессе проведенной отработки установлено, что программы управления намоточным станком обеспечивают выполнение изготовления УО по зонам в соответствии с требованиями параметров намотки; плавную (без рывков) траекторию движения координат намоточного станка; величину натяжения ленты на экваторе, а также ширину ленты; зазоры в стыках лент и равномерный прирост толщины УО без выхода пластика за зону ограничения намотки.

Результаты отработки программ приведены в табл. 4

Таблица 4 – Результаты отработки программ намотки УО

Наименование показателей	Номера зон намотки															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Начало зоны по дуге, мм	0	28	47	67	85	104	123	141	161	179	198	217	236	256	275	295
Нулевые точки координат: Z, мм	2052	2040	652	665	680	700	724	752	790	827	875	920	971	2023	2077	2134
X, мм	1282	1282	1184	1182	1192	1200	1216	1238	1246	1264	1274	1293	1315	1334	1359	1381
A, град	7,63	16,6	23,7	30,10	30,5	41,2	46,5	51,2	56,1	60,7	65	69,1	73,1	76,7	80,6	83,8
B, град	90	90	55,3	55,8	56,7	58,1	59,8	61,5	63,7	66,2	68,7	71,5	74,5	77,4	80,9	83,8
Скорость намотки, %	110	110	115	123	125	125	130	130	130	130	135	135	135	120	120	120
Количество витков в слое, шт.	76	75	73	71	69	65	62	58	53	49	43	38	32	26	19	13
Величина натяжения на экваторе, Н	Не менее 300 Н на ленту															
Ширина ленты на экваторе, мм	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Количество жгутов в ленте по зонам, шт.	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Зазор в стыках лент, мм	Не более 1															

Отработка технологии намотки упрочняющей оболочки проводилась на баллонах 1Т, 1П в целях подтверждения правильности выбранной схемы, технологии намотки УО и ее прочности.

Отрабатывались следующие параметры в соответствии с технологическим процессом:

- обеспечение установки и съема металлического корпуса;
- величина натяжения жгута в армирующей ленте при выходе из нитетракта;
- величина натяжения армирующей ленты на экваторе;
- ширина армирующей ленты на экваторе;
- величина натяжения армирующей ленты в точках ее разворота;
- регулирование натяжения армирующей ленты;
- содержание связующего в армирующей ленте;
- вязкость связующего при температуре его переработки;
- температура связующего в пропиточной ванночке;
- намотка технологической рубашки;
- режим термообработки упрочняющей оболочки;
- выходные геометрические параметры упрочненного баллона;
- масса упрочненного баллона;
- скорость вращения металлического корпуса баллона с УО при полимеризации в печи.

Металлический корпус устанавливался в центрах намоточного станка с помощью приспособления для намотки. На корпус наматывалась лента, сформированная из органожгута Русар, пропитанная связующим ЭДТ-10.

Начальное натяжение жгутов, составляющих армирующую ленту, регулировалось специальным прижимным устройством на шпулярнике. Тарировка единичного жгута проводилась перед началом намотки прибором ИНЖ-1 и составляла 20 ± 5 Нс на жгут. Контроль натяжения армирующей ленты в процессе намотки осуществлялся прибором на панели управления станком с записью на диаграмме.

Ширина ленты контролировалась на экваторе изделия линейкой в начале намотки каждой зоны при установке «нулевых» точек.

Пропитка органожгута эпоксидным связующим ЭДТ-10 осуществлялась в процессе намотки с определением его вязкости и времени желатинизации.

Контроль температуры связующего в пропиточной ванне проводился термодатчиком с записью на диаграмме.

Количество витков армирующей ленты в каждой зоне намотки, скорость намотки задавались программой управления и контролировались приборами панели управления станком.

Процентный нанос связующего в ленте определялся перед началом намотки согласно ОСТ 92-0903-78.

Для стабилизации содержания связующего по толщине оболочки и получения гладкой наружной поверхности проводилась намотка технологической рубашки конструкционной стеклолентой ЛЭС (0,15x35) мм.

Намотанная оболочка проходила термообработку в печи аэродинамического подогрева (ПАП - 2) по следующему режиму:

- $(80 \pm 5)^\circ\text{C}$ – 3 часа; $(120 \pm 5)^\circ\text{C}$ – 3 часа; $(160 \pm 5)^\circ\text{C}$ – 3 часа.

Охлаждение велось до $60 \pm 5^\circ\text{C}$ при закрытой двери печи. Подъем температуры в печи и охлаждение – свободны.

Выбранный режим соответствует требованиям ОСТ 92-0957-78 и обеспечивает получение степени полимеризации до 96%.

С термообработанной оболочки проводились съём технологической рубашки, взвешивание, замер расстояния между наконечниками и окончательная сдача-приемка изделия.

Технологические параметры отработки изготовления УО приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Технологические параметры отработки технологии изготовления УО

Наименование параметров	Значение параметров	
	КД	Факт
Величина натяжения жгута в армирующей ленте при выходе из нитетракта, Н	100±10	100±10
Ширина армирующей ленты на экваторе, мм	18	18-19
Величина натяжения армирующей ленты в точках ее разворота, Н	-	120 – 150
Величина натяжения армирующей ленты на экваторе, Н	не менее 300	не менее 300
Массовое содержание связующего в армирующей ленте, %	27 ⁺³	27,25- 27,5
Вязкость связующего при температуре его переработки, с	Не более 30	25-28
Температура связующего в пропиточной ванночке, °С	60±5	60±5
Степень полимеризации связующего, %	Не менее 94	96
Масса упрочненного баллона, кг	13,1	1Т-13,3; 2П –13,05
Масса металлического корпуса	5,7	1Т-5,95; 2П -5,7
Масса армирующей оболочки, кг	-	1Т-7,35; 2П-7,4
Скорость вращения металлического корпуса баллона с УО при полимеризации в печи, об/мин.	1 ^{+0,5}	1 ^{+0,5}

От каждой бобины отбирались и изготавливались образцы сухого жгута длиной 160 мм для определения его разрывной нагрузки при растяжении.

Образцы испытывались в специальных зажимах с полиуретановыми накладками и наждачной шкуркой с зажимной длиной 60 мм, расстояние между зажимами составило 100 мм.

Результаты испытаний приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты испытаний разрывной нагрузки
(номер партии жгута 28)

Номер бобины жгута		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Разрывная нагрузка, кН									
Номер образца	1	2,49	2,41	2,45	2,35	2,43	2,49	2,49	2,42	2,49	2,41
	2	2,47	2,47	2,45	2,35	2,55	2,43	2,26	2,39	2,49	2,35
	3	2,43	2,51	2,22	2,35	2,37	2,49	2,55	2,31	2,39	2,45
	4	2,45	2,43	2,63	2,35	2,63	2,55	2,41	2,47	2,33	2,51
	5	2,53	2,53	2,71	2,22	2,57	2,47	2,28	2,43	2,51	2,49
	6	2,49	2,47	2,39	2,22	2,51	2,39	2,43	2,33	2,63	2,31
Средняя разрывная нагрузка, кН		2,46	2,47	2,48	2,31	2,51	2,47	2,40	2,39	2,47	2,42

Баллон № 1Т был подвергнут гидравлическому нагружению с плавным повышением давления до 35, 38, 43, 48 и 52 МПа с выдержкой на каждом этапе 4 мин и дальнейшим нагружением до разрушения.

Баллон разрушился при давлении 69,5 МПа. Требования по запасу прочности (не менее 69,2 МПа) на баллон 1Т было выполнено.

Баллон № 1П проходил испытания на подтверждение прочности при циклических рабочих нагрузках. Он был подвергнут гидравлическому нагружению $P_{раб} = 34,6$ МПа с повторением испытаний 15 раз (эксплуатационный ресурс баллона $n_{экс} = 15$). Снижение давления в баллоне до нуля с последующим осмотром баллона. Продолжение циклических нагружений баллона до общего количества циклов $2n_{экс} = 30$, снижение давление в баллоне до нуля, осмотр баллона. Продолжительность циклических нагружений рабочим давлением до разрушения. Баллон разрушился после 133 циклов нагружения рабочим давлением. Требования по суммарному количеству циклов нагружения рабочим давлением на баллоне 1П выполнено (суммарное количество циклов при эксплуатационной отработке – до 50 раз).

Для технологической отработки неразрушающего голографического метода контроля равнопрочности УО был изготовлен баллон 1ГЛ. После испытания на герметичность давлением 52 МПа баллон направлен в институт электросварки им. Е.О. Патона для опробования неразрушающего контроля качества УО баллона с использованием метода и аппаратуры электронной широгрaфии.

Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

1. В качестве материала для упрочняющих оболочек выбран органоупластик на основе высокомодульного органоупласта Русар со средней разрывной нагрузкой более 2,20 кН и эпоксидного связующего ЭДТ-10.

2. Спроектирована, изготовлена, смонтирована и отлажена технологическая оснастка, обеспечивающая изготовление упрочняющей оболочки на намоточном станке с программным управлением и вращением баллона в печи при полимеризации.

3. Отработаны программы управления намоточным станком при намотке упрочняющих оболочек. Программы обеспечивают намотку УО по зонам в соответствии с требуемыми параметрами намотки.

4. Отработана технология изготовления упрочняющих оболочек для комбинированных шаровых баллонов высокого давления (баллоны 1Т и 1П).

5. Проведены испытания на прочность баллона 1Т. Предъявляемые требования по запасу прочности на баллон выполнены.

6. Подтверждена прочность при циклических рабочих нагрузках баллона 1П. Требования по суммарному количеству циклов нагружения при экспериментальной отработке выполнены.

7. Массовые характеристики упрочненного баллона соответствуют их расчетным значениям.

Список использованных источников

1. Коваленко, В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 5(82). – С. 14 – 20.

2. Кондратьев, А.В. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 3 (67). – Х.: ХАИ, 2011. – С. 7 – 18.

3. Кондратьев, А.В. Состояние проблемы научного обеспечения эффективной технологии производства агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 6(83). – С. 17 – 25.

4. Дегтярев, А.В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники [Текст] /

А.В. Дегтярев, В.А. Коваленко, А.В. Потапов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 2(89). – С. 34 – 38.

5. Композиционные материалы в разработках ГП «КБ Южное» / А.М. Потапов, В.А. Коваленко, Ю.Г. Артеменко и др. [Текст] // *Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 30 междунар. науч.-практ. конф., Ялта 7–11 июня 2010 г. / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология»*. – К., 2010. – С. 111 – 119.

6. Экспериментальные исследования несущей способности шаробаллона высокого давления [Текст] / Г.И. Быковченко, А.М. Колос, В.В. Лаврешов и др. // *Космическая техника. Ракетное вооружение: науч.-техн. сб. ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»*. – Вып. 1. – Днепропетровск, 2011. – С. 186 – 196.

7. Композиционные материалы [Текст]: справ. / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

8. Отработка технологии изготовления и испытания опытных образцов тепловых экранов для космических аппаратов [Текст] / И.А. Гусарова, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, А.М. Потапов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 2(99). – С. 14 – 20.

9. Полимерные композитные конструкции [Текст] / В.И. Демичев, В.А. Коваленко, И.В. Малков и др // *Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3 т. – Т.2. Передовые технологии производства* / В.В. Скороход, Н.А. Никифоров, С.В. Резник и др.; под ред. С.В. Резника. – М.: Изд-во ИГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – С. 86 – 160.

Поступила в редакцию 03.09.2013.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*